

2.1 大規模土石流・深層崩壊・天然ダム等異常土砂災害の被害推定・対策に関する研究

研究予算 : 運営費交付金 (一般勘定)
研究期間 : 平 23～平 27
担当チーム : 火山・土石流チーム
研究担当者 : 石塚忠範、木下篤彦、森田耕司、
高原晃宙、清水武志

【要旨】

本プロジェクト研究は、大規模土石流・深層崩壊・天然ダム等異常土砂災害に対する施設整備や緊急時の危機管理体制に資する調査手法等、被害軽減のための対策を着実に実施するための研究・技術開発を目的としている。2011 年および 2012 年においては、大規模な深層崩壊および天然ダム等異常土砂災害が日本国内外で発生した。規模の大きな崩壊は、発生頻度が低いため、これらの現象に対する調査を着実に行うことは重要である。本報告書では、2011 年に台風 12 号によって紀伊半島で発生した深層崩壊に関する地形的な特徴の分析結果、および 2012 年に発生し 2013 年に決壊した、インドネシアのアンボン島の天然ダムに対する警戒避難や現地調査結果を報告する。

キーワード : 深層崩壊、紀伊半島、台風 12 号、河道閉塞、天然ダム、アンボン

1. はじめに

近年、発生頻度が必ずしも高くないものの、甚大な被害を生じるおそれのある、大規模な土砂移動現象の調査・対策方法の立案、高度化が急がれる。

紀伊半島において、2011 年台風 12 号により多くの深層崩壊が発生すると共に、その土砂によって河道が閉塞されて形成された天然ダムの越流決壊による災害発生も懸念された。一方、外国の例ではあるが、翌 2012 年にインドネシアのアンボン島において、紀伊半島で発生した最大級の天然ダムと同程度の天然ダムが形成され、1 年間の存続の後、決壊した。

当チームでは、表題のプロジェクト研究の中で深層崩壊、天然ダムに対する実態調査、対策研究を実施している。台風 12 号において発生した深層崩壊は、その発生前後の航空レーザ測量とともに、多数のボーリング調査が実施された、国内初の事例である。そのため、これらの情報を収集して、深層崩壊の地表やすべり面の形態的特徴について、詳細に分析を試みた。この成果を 2 章で紹介する。

一方、台風 12 号において、山間地の可搬性や通信が良好でない場合でも活用できる土研式水位観測ブイを用いて、天然ダム上流の湛水位の測定と警戒避難体制の構築を実施した経験を生かし、当チームは、アンボンの天然ダムについて、国土交通省と協力しつつ、インドネシア政府と警戒避難体制に必要な観測を共同で実施し、技術的な助言を行った。こ

れらの取り組みにより、天然ダム越流決壊前に下流域の住民を避難させることに成功し、集落は破壊されたものの死傷者をほとんど出さない、天然ダム災害史上画期的な警戒避難の成功事例となった。併せて、天然ダム決壊後の下流の状態に関する調査事例が少ないことから、天然ダム越流決壊後の土石流堆積物の粒径などの材料調査の実態調査を行った。3 章では、上述のアンボンの天然ダムに対する技術的支援の内容と共に、天然ダム越流侵食前後の地形変化や粒径の調査結果について紹介する。

2. 2011 年台風 12 号により紀伊山地において発生した深層崩壊の形態的特徴と規模

2.1 概要

2011 年 9 月初め、紀伊半島では台風 12 号の豪雨により、深層崩壊が 72 箇所が発生した¹⁾(図-1)。崩壊した土砂の一部は斜面を滑落して溪流を流下したほか、いくつかの箇所では天然ダムが形成され、多大な被害が生じることが懸念された。

被害の大小は崩壊地から生産される移動土塊量の大小に依存するため、当該土塊量を正確に把握することが重要である。そのためには、崩壊前後の地形と崩壊地のすべり面形状の把握が必要である(図-2)。また、移動土塊の内のどれだけの量が深層崩壊範囲外へ流出するのか(図-2 の③)を把握する事も対策上極めて重要である。

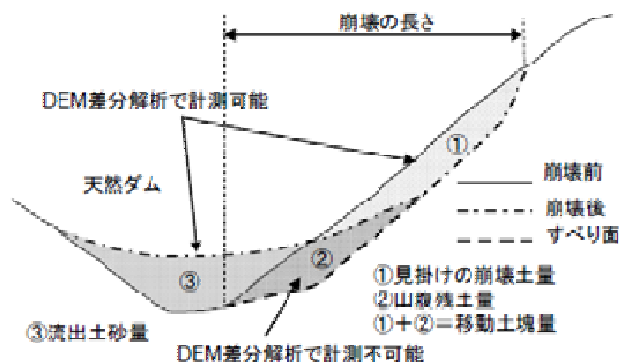


図-2 深層崩壊発生前後で必要な地形情報

表-1 調査対象の深層崩壊地の諸元

※1) No.及び地区名は参考文献1)に同じ
2) $V=0.074 \times A^{(1.45)}$
注)No.34の移動土塊面積は拡大崩壊後の面積、航空写真判読に対応する面積は13,808^m²

そこで、国土交通省近畿地方整備局および奈良県によって深層崩壊が発生する前に取得された航空レーザ測量成果を1m格子幅に補間した数値標高モデル（以下、LiDARデータ）と深層崩壊地内で実施された調査ボーリング結果を用いて、深層崩壊におけるすべり面形状を推定した。調査の結果、深層崩壊のすべり面形状は、地すべりのすべり面形状とは異なる特徴を有することが明らかになった。また、深層崩壊の面積、移動土塊量、深層崩壊範囲外へ流出した土塊量の測定結果から、崩壊面積と移動土塊量あるいは流出した土塊量の関係を調べた。以下、これらについて報告する。なお、本章の成果は磯貝ら²⁾が公表した成果に基づいている。

2.2 調査地概要

紀伊山地は、紀ノ川の北側をほぼ東西に延びる中央構造線よりも南側の西南日本外帯に位置し、最北部に三波川帯と秩父帯が分布し、その南側の広い範囲は四万十帯が分布している。四万十帯は白亜紀から古第三紀の付加体コンプレックスからなり、砂岩、泥岩、礫岩等が分布している。

2.3 データ

地形データとしては、国土交通省近畿地方整備局および奈良県によって深層崩壊が発生する前に取得された航空レーザ測量成果を 1m 格子幅に補間した数値標高モデル（以下、LiDAR データ）を用いた。ただし、後述するように、最大規模の深層崩壊が発生した栗平地区では崩壊前の数値地形モデルが存在しなかったため、崩壊前については平成 21 年に撮影された空中写真を用いて地形モデルを作成した。

分析に用いた深層崩壊は、72 箇所のうち深層崩壊発生前後の LiDAR データが存在する 18 箇所と栗平地区での深層崩壊を加えた 19 箇所である (図-1)。

調査ボーリングは、国土交通省近畿地方整備局によって7箇所の深層崩壊地内で計40本実施されており、すべり面形状推定のためのデータとして用いた(表-1)。

2.4 深層崩壊のすべり面形状の推定と分類

2.4.1 検討手順

深層崩壊のすべり面形状の推定を行うために実施した方法は、次の通りである： 1) LiDAR データを

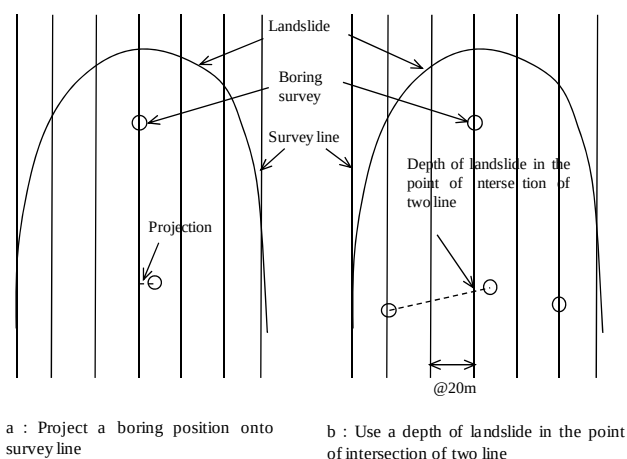


図-3 深層崩壊のすべり面形状の推定方法

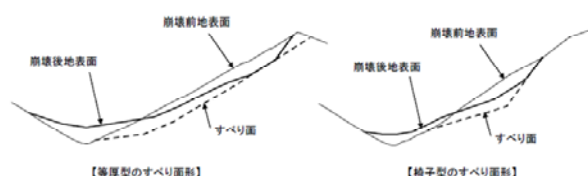


図-4 深層崩壊のすべり面形状の分類

用いて作成した陰影起伏図およびオルソフォト等を用いて深層崩壊の崩壊方向を決定、2) 崩壊頂部を通過する点を基点として崩壊方向に平行に 20m 間隔で断面図を作成 (No.38 栗平地区のみ 50 m 間隔)、3) 断面図に 2 本以上の調査ボーリングが表示できる 12 断面を選定、4) すべり面形状と崩壊前後の地形を詳細に比較。以上の方法を図示すると図-3 の通りとなる。

2.4.2 深層崩壊におけるすべり面形状

2.4.1 節の方法により深層崩壊の断面図をボーリング調査結果と比較した結果、深層崩壊の特徴として、すべり面の末端が斜面途中に存在し斜面脚部ではない場合が多かった。また、岩盤地すべりの分類と比較してみると、深層崩壊はすべて末端開放型であり、末端部のすべり面勾配が主すべり面勾配と逆勾配である末端閉鎖型のすべりは確認されなかった。また、すべり面形状と崩壊前後の地形の比較検討より、すべり面形状は 2 種類にし、「等厚型」および「椅子型」として整理した (図-4) ²⁾。

等厚型は、谷から尾根まで一つの斜面が崩れ落ちる大規模な深層崩壊地の特徴的なすべり面形状である。崩壊前の地表面形と平行なすべり面形状を有する事が特徴であり、移動土塊は等厚の細長い形を呈す。旧地表面とすべり面、および崩壊の落ち残りとの旧地表面とが、それぞれ等厚・平行を成す。ただし、旧地

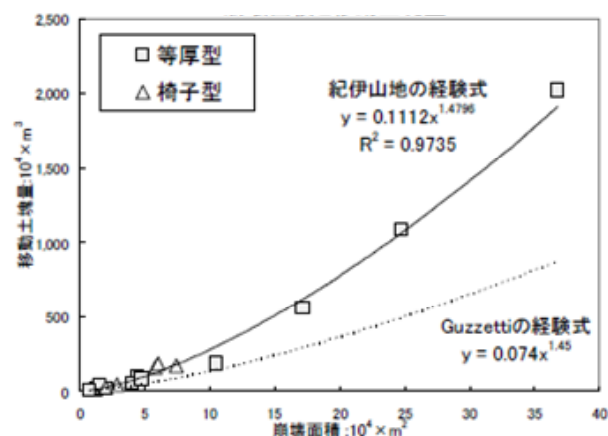


図-5 崩壊面積と移動土塊量の関係

表面が階段状の地形をなす場合もある。地すべりにおける平行型すべり面 (層状すべり面) ³⁾ と類似した形態的特徴を有するものの、末端斜面の勾配が著しく異なる。例としては、栗平、赤谷、長殿など山頂付近から発生するものが、この型に該当する。

一方、椅子型は、山腹斜面の途中から崩壊する深層崩壊地の特徴的なすべり面形状である。急傾斜で比較的大きな滑落崖が椅子の背を形成し、緩傾斜で比較的大きなすべり面が椅子の座を形成している事が特徴であり、崩壊前の地表面と滑落崖、すべり面で三角形を呈す。地すべりにおける椅子型地すべりとはほぼ類似しており、今回分析した深層崩壊では、すべり面が折れた 2 直線で表現される。すべり面傾斜角が地表面傾斜角より緩く末端開放型であり、頭部に明瞭な小崖が形成され、斜面中腹より発生するものが多い。清水 (宇井)、冷水、芦瀬、坪内谷、濁谷の深層崩壊が該当する。

2.5 崩壊に関する土砂量の算出

2.4 に示す方法ですべり面形状を推定した後、見掛けの崩壊土量面積 (推定崩壊面積)、山腹残土量面積、崩壊の長さ等 (図-2 参照) を測定し、平均断面法を用いて面積・土塊量を算出した。結果を表-1 に示す。なお、見かけの崩壊土量と山腹残土量の面積の和を移動土塊平面積、それを用いて算出される土塊量の和を移動土塊量と呼ぶことにする。19 箇所の深層崩壊地による崩壊地面積と移動土塊量の関係を図-5 に示す。回帰式を作成すると式(1)の冪乗の関係式で表され、Guzzetti の経験式 ⁴⁾ の 2.0~2.2 倍 (崩壊面積としては 1~40 ha の差) の値が算出される。

$$V = 0.111 \times A^{1.480} \quad \dots\dots(1)$$

ここに、V: 移動土塊量 (m³)、A: 移動土塊平面積 (m²)。

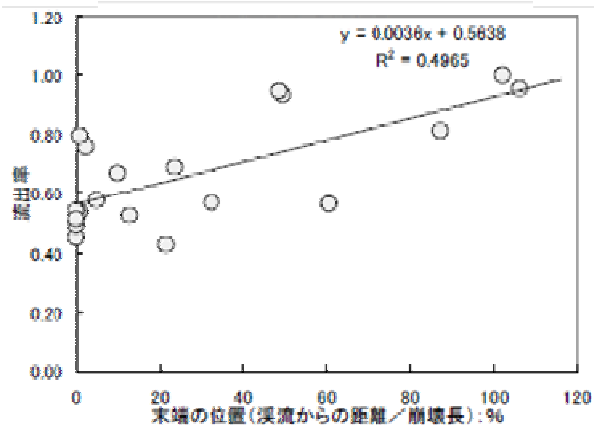


図-6 深層崩壊末端の位置と流出率の関係

なお、回帰分析における相関係数は0.974であった。

次に、崩壊範囲外へ流出した土塊量と移動土塊量の関係を見るため、崩壊範囲外へ流出した土塊量/移動土塊量を流出率として定義し、検討した。ただし、崩壊地外へ流出した土塊量は下流への流出等により正確に測定する事が出来ない。その為、崩壊範囲外へ流出した土塊量の地山量である見掛けの崩壊土量（流出に寄与したと想定される地山量；図-2①）を用いることとして、流出率は見掛けの崩壊土量/移動土塊量（図-2①+②）として算出することとした。流出率を表-1のデータより算出し、図-6に末端の位置と流出率の関係を示す。これらの回帰式は式(2)で表される。

$$R = 0.0036 \times P_e + 0.5653 \quad \cdots \cdots (2)$$

ここに、 R は流出率、 P_e は末端の位置であり、 $L_b/L_{\max} \times 100\%$ として算出する。なお、 L_b は末端の溪流からの距離、 $L_{\max}$ は崩壊地の最大水平長である。式(2)の回帰式の相関係数は0.497であった。

2.6 まとめ

本研究では、2011 年台風 12 号によって紀伊半島で発生した深層崩壊 19 事例に対して、崩壊前後の LiDAR データ（一部空中写真測量）による数値地形モデルおよびボーリング調査結果を用いて、詳細なすべり面形状を推定と崩壊土砂量等の分析を行った。

その結果、深層崩壊のすべり面形状については、今回の分析した範囲では、「等厚型」と「椅子型」の 2 つに分類された。等厚型については、岩盤地すべりにおける平行型すべり（層状すべり）と類似しているものの、末端の形状が異なることが特徴である。一方、「椅子型」については岩盤地すべりにおける分類と類似しているものの、分断的な直線ですべり面が表現されることが分かった。さらにすべり面形状



図-7 アンボン島位置図



図-8 形成された天然ダムとリマ村（インドネシア公共事業省撮影）

が推定することで、崩壊土塊量や移動土塊量を算出することが可能であることが分かった。また、崩壊発生後に計測が容易な崩壊面積と移動土塊量との回帰式を提案した。

3. インドネシア・アンボン島における天然ダム

3.1 概要

2012 年 7 月、インドネシア・アンボン島で高さ約 140m に及ぶ大規模な天然ダムが発生した（図-7、8）。天然ダムより 2 km 下流には約 5 千人が住む村があり、天然ダム決壊による大規模土石流の被害が懸念された。土木研究所では、被害軽減のための警

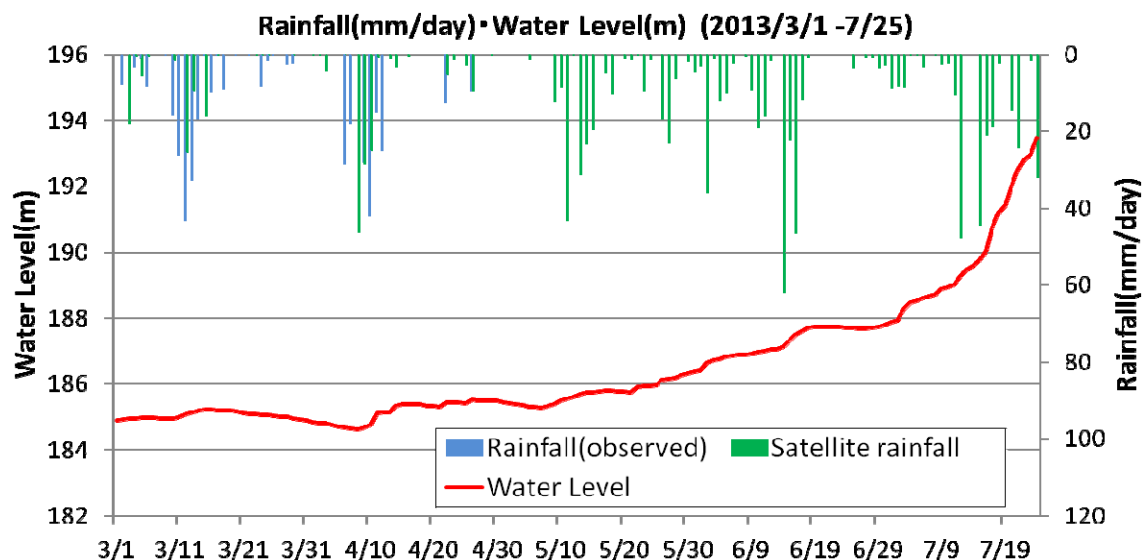


図-9 天然ダム湛水位の観測結果

戒避難の実施に向け、土研式水位観測ブイを用いた天然ダム湛水位の共同観測等、インドネシア公共事業省に対する技術支援を行ってきた。天然ダムは、発生から1年を経過した2013年7月に決壊したが、避難の実施により人的被害は最小限に抑えられた。

3.2 天然ダム概要

アンボン島は東経130°南緯3°付近にあり、天然ダムが形成されたワイエラ川は、マルク州の州都アンボン市から西北西に約25 kmに位置する。下流には、人口約5,300人のリマ村がある。

2012年7月12日、ワイエラ川の河口から約3 km、右岸側の山体が大規模崩壊を起こし、天然ダムを形成した。崩壊の規模は衛星写真からの概略の推定で長さ幅約500m、深さ約100m、崩壊地面積0.67km²、標高差約300m、崩壊土砂量が約1,260万m³、と推定された。

3.3 土研式投下型水位観測ブイによる湛水位の共同観測

天然ダムが決壊する要因の一つとして、湛水位の上昇により天然ダム天端の水が越流し、土塊の侵食が急速に進むことで決壊に至る“越流侵食”があり、過去の決壊事例の大半を占めている。このため天然ダムの湛水位を監視することが、被害軽減を図る上で重要であり、地上からの水位観測に加えて、土木研究所が開発した水位観測ブイを天然ダムに設置し、共同観測を実施することとした⁵⁾。水位観測ブイの設置・観測にあたっては、2013年2月25日にジャカルタで開催された日本・インドネシアの砂防技術

協力に関する共同ワークショップにおいて、インドネシア共和国公共事業省との間で共同研究協定を締結した。

水位観測の結果は、衛星通信回線を通じてインドネシア公共事業省、同水資源研究所、土木研究所にほぼリアルタイムで伝送され、警戒避難の実施に活用された。(図-9)。土木研究所では、得られた観測データをもとに降雨量と水位の関係について、継続的に整理・分析を行い、インドネシア水資源研究所と情報共有を行った。インドネシア水資源研究所では、水位観測結果と降雨予測プログラムを用いた降雨予測から越流発生日の予測を行い、公共事業省マルク水資源事務所を通じて関係機関に情報提供が行われた。

3.4 天然ダム決壊洪水の経過

図-10の写真に沿って天然ダム決壊洪水の経過を述べる。インドネシア政府は、水位が急速に上昇し始めた7月以降、警戒を強めていたが、7月11日に準備水位(標高188 m)を、17日に警戒水位(同191 m)をそれぞれ突破した。そして、7月24日夕刻に、建設途中であった排水路工の敷高(標高195 m)に水位が到達し、翌25日早朝、排水路工上を越流し始めた。越流水により堤体の侵食が徐々に進行し、10時過ぎに侵食は天然ダム天端に及んだ。その後12時半前後に堤体の急速な侵食が始まり、決壊洪水がほぼピーク流量近くに達したものと考えられる。決壊に伴うサージ状の流れは、13時半過ぎにほぼ収束した。



図 -10 決壊洪水の経過（インドネシア公共事業省撮影）



図-11 決壊後の天然ダム

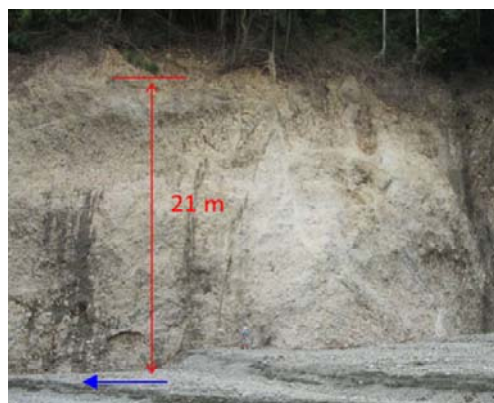


図-12 河道内における洪水痕跡



図-13 氾濫域の洪水前後の比較（左：決壊前、右：決壊後）

3.5 決壊後の現地調査

3.5.1 概要

決壊後の天然ダムの水位は、決壊前の最高水位より 50 メートル程度下がっており、およそ約 2,500 万 m^3 の湛水が流出したものと推定される。決壊により形成された現在の流路の兩岸は、右岸約 45 度、左岸約 30 度と急勾配の斜面で構成されており、急峻な河谷状を呈している（図-11）。

天然ダム下流の河道には、大量の不安定土砂が堆積している。災害前後の写真に写った岩壁を指標として、天然ダム下流端付近の河床の上昇量を推定すると、約 25~35 mであった。また、河床の上昇に伴い、河道幅は著しく拡大している。河道内の洪水痕跡は、現在の河床から 20 m以上の箇所も見られた（図-12）。

下流氾濫域では、旧扇状地形に沿って、溪谷の出口から海岸に至るまで土砂が堆積しており、扇状地の両端を除いて、建物の大半が流失している。氾濫面積は、およそ 37 万 m^2 である。残存している建物の壁面や立木に残された洪水痕跡を計測したところ、浸水深は大きいところで 3.0~3.5 m程度であった。扇状地の中央付近の建物、植生はすべて流出していることから、洪水水位はさらに高かったと思われる（図-13）。なお、これらの計測値は手持ちレーザ距離計（レーザテクノロジー社製 TruPulse 360）を用いた簡易測量等の結果によるものである。

3.5.2 粒径調査

大規模な天然ダムの越流決壊後に発生する土石流の実態を現地調査した報告は多くはない。特に下流の土石流の材料物性の報告は非常に少ない。そこで、土石流の流下後に堆積した河道および扇状地を対象に、天然ダム決壊 2 ヶ月後の 9 月 17 日に粒径調査を行った。なお、天然ダムを構成する土塊については、決壊前の 2012 年 9 月にも粒径調査を行ったので、併せて報告する。

試料採取位置は、粒径調査は決壊前 1 箇所、決壊後 6 箇所の計 7 箇所である。流動化した土砂の縦断

的、平面的な粒径分布を把握するため、現地において堆積土砂の状況を確認し、試料採取地点を設定した(図-14)。(A)河道内と(B)扇状地右岸では区間内および周辺一帯がほぼ同様の河床材料であると現地踏査で判断できたため、それぞれ1箇所の調査地点を設定した。

計測方法は基本的に容積サンプリング法とした。各地点で縦50 cm×横50 cm×深さ10 cmを採集し、粒径75 mm以上は1個毎に短径、中径、長径、重量を計測し、粒径75 mm未満はふるい分け試験を実施した。(C2)扇状地左岸中上流地点についてはこぶし大以上の礫が集中して存在し、容積サンプリング法では採取が困難であったため、線格子法により粒径分布を計測した。線格子法の格子サイズは2 mとし、縦25地点×横4地点の100地点に存在する礫の長径、中径、短径を計測し、体積換算した値をもとに粒径加積曲線を作成した(表-2)

調査結果を図-15に示す。本調査では、(C4)扇状地左岸下流地点と(B)扇状地右岸地点の粒度分布を見ると、他地点と較べて粒径は小さい傾向にあり、(C2)扇状地左岸中上流地点では大きい傾向にあった。(B)地点と(C4)地点に小さな粒径が分布していたことから、土石流先頭部が(C2)地点に停止・堆積後、小さな粒径を含む後続流は巨礫群を避けて右岸側に進路を変更したり、一部は巨礫群を乗り越えながら、巨礫群中の細粒分を下流へ流出させたりして氾濫したと考えられる。さらに、扇頂部



図-14 試料採取位置

表-2 計測方法一覧

天然ダム 状況	採取位置	計測方法	
		容積採取	線格子法
決壊後	(A) 河道	○	
	(B) 扇状地 右岸	○	
	(C1) 扇状地 左岸上流	○	
	(C2) 扇状地 左岸中上流		○
	(C3) 扇状地 左岸中下流	○	
	(C4) 扇状地 左岸下流	○	
決壊前	(D) 天然ダム形成土塊	○	

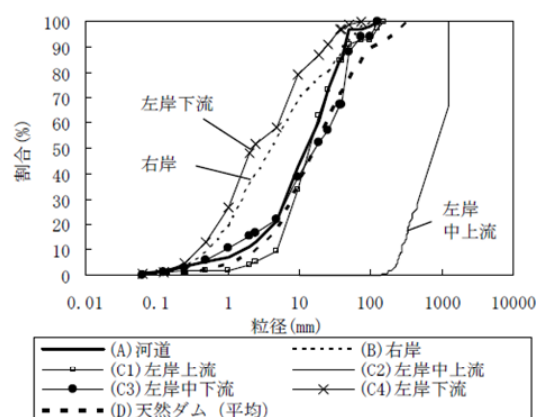


図-15 粒度分布調査結果

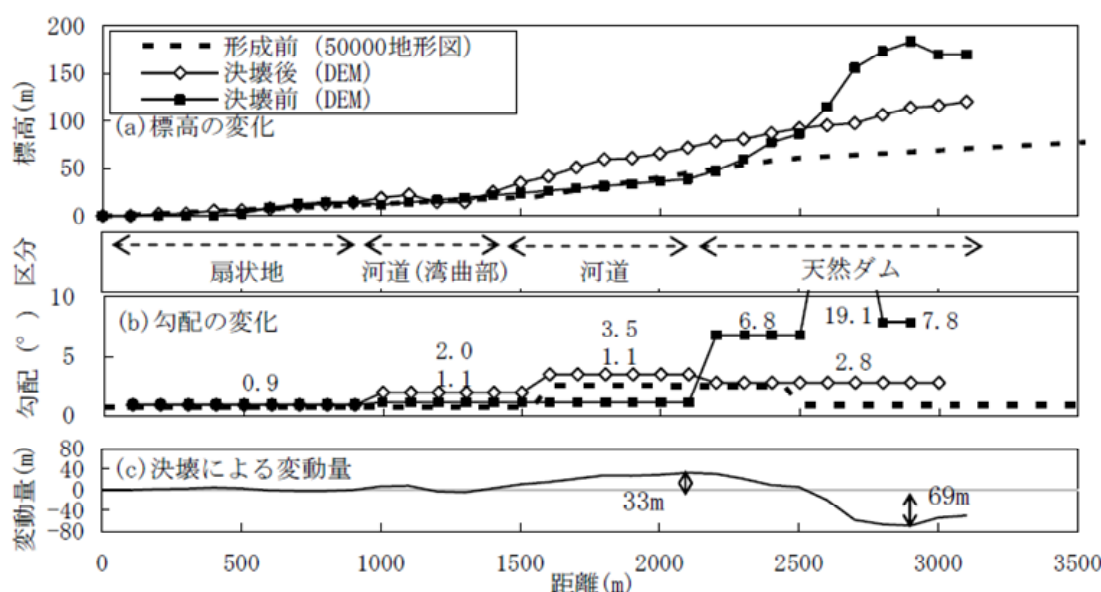


図-16 天然ダム決壊による地形特性の変化

直上流は左岸側を外湾とした湾曲部であるため、土石流先頭部は左岸側に偏ったものと推察する。加えて、(B) 地点付近に存在した工事用に掘削したと思われる縦穴では元地盤高から約 1 m の厚さで土砂の堆積が確認でき、その内部構造は礫分と砂分が層状に堆積していた。このため、発生した土石流は流下中に首振り現象もしくは複数の段波を発生させていた可能性がある。

3.5.3 詳細地形調査

現地調査後、衛星写真の購入やインドネシア政府が空撮した空中写真の提供を受けたことから、天然ダム決壊前後の数値標高モデルを作成し、地形計測を行った。天然ダムの土塊は最大で 69 m 侵食されたものの、天然ダムは決壊後も形成前の元河床までは侵食されていなかった(図 - 16 (a))。また、天然ダム直下に土砂が堆積していた(図 - 16 (c))。扇状地区間の勾配は決壊前後とも 0.9° で変化がなかった(図 - 16 (b))。天然ダム区間の勾配は決壊前の $6.8\sim 19.1^{\circ}$ から 2.8° に緩くなり、天然ダム形成前の河床勾配に近い値となった。河道区間の勾配は決壊前の 1.1° から $2.0\sim 3.5^{\circ}$ に変化し、急勾配となった。扇状地のの上流の河道区間には湾曲部や狭窄部が存在するため、土砂がスムーズに流下せず、堆積が進行したことで勾配が急になったと考えられる。

謝辞

インドネシアにおける調査にあたっては、インドネシア公共事業省関係者ならびに JICA 長期専門家、現地調査を共にした交流研究員、八千代エンジニアリング(株)をはじめとする調査団のメンバーに多大な協力をいただいた。ここに記して、謝意を申し上げる。

参考文献

- 1) (独) 土木研究所土砂管理グループ火山・土石流チーム：平成 23 年台風 12 により発生した深層崩壊について， http://www.pwri.go.jp/team/volcano/deep_seated_landslides/deep_seated_landslides_Typhoon12_2011.htm, 2012.
- 2) 磯貝尚弘、森田耕司、石塚忠範、木下篤彦、高原晃宙：2011 年台風 12 号により紀伊半島で発生した深層崩壊の面積と土塊量、平成 26 年度砂防学会研究発表会、2014
- 3) 渡正亮：岩盤すべりとすべり面，地すべり技術，

Vol.23, No.2, pp.52～54, 1996.

- 4) Guzzetti F., Ardizzone F., Cardinali M., Rossi M., Valigi D.: Landslide volumes and landslide mobilization rates in Umbria, central Italy: Earth and Planetary Science Letters 279, pp.222-229, 2009.
- 5) 土木研究所火山・土石流チーム：インドネシア・アンボン島の河道閉塞（天然ダム）に対する観測の支援について、河川、No.803、p.49-52、2013
- 6) インドネシア国家防災庁 HP：
<http://www.bnpb.go.id/news/read/1541/14-hari-masa-tanggap-darurat-bencana-way-ela>

A STUDY ON DAMAGE ESTIMATION AND MEASURES FOR SEDIMENT -RELATED DISASTERS CAUSED BY DEEP CATASTROPHIC LANDSLIDES

Budget: Grants for operating expenses
General account

Research Period: FY2011-2015

Research Team: Erosion and Sediment
Control Research Group
(Volcano and Debris flow)

Authors: ISHIZUKA Tadanori,
KINOSHITA Atsuhiko
MORITA Koji,
TAKAHARA Teruyoshi,
SHIMIZU Takeshi

ABSTRACT:

This research aims to develop a technique for planning constructions and arranging crisis management framework in an emergency against devastating sediment disaster due to large scale debris flow, deep catastrophic landslide (DCL) and landslide dam. In 2011 and 2012, devastating sediment disasters due to large scale DCLs and landslide dams occurred in Japan and abroad. It is important to investigate these phenomena steadily because the frequency of occurrence of large scale slope failure is low. In this report, the topographically unique point of DCLs occurred in Kii peninsula due to Typhoon Talas, 2011 and the way of caution and evacuation against flood subsequent to overtopping of a landslide dam formed in Ambon island, Indonesia was revealed. The landslide dam was appeared in 2012 and overtopping occurred in 2013. Moreover, the results of field survey relating to the landslide dam was indicated.

KEY WORDS:. Deep catastrophic landslides, Kii peninsula, Typhoon Talas, Landslide dam, Ambon